

Prospección Geofísica por Tomografía Eléctrica en el karst de la Sierra de Atapuerca

Ana Isabel Ortega Martínez ⁽¹⁾⁽²⁾

Alfonso Benito Calvo ⁽¹⁾⁽²⁾

José Ángel Porres Benito ⁽²⁾

Alfredo Pérez González ⁽¹⁾

Miguel Ángel Martín Merino ⁽²⁾

⁽¹⁾Centro Nacional de Investigación sobre Evolución Humana (CENIEH)

⁽²⁾Grupo Espeleológico Edelweiss

⁽³⁾Área de Ingeniería del Terreno (E.P.S. Universidad de Burgos)

Introducción

El objetivo de los trabajos de Tomografía de Resistividad Eléctrica (ERT en sus siglas inglesas) desarrollados en el karst de Atapuerca fue resolver algunos aspectos clave de su evolución geodinámica, tales como 1) la determinación en profundidad de los contactos y estructuras geológicas que controlan el desarrollo del endokarst, 2) el análisis de las morfologías endokársticas (continuidad de los conductos y geometrías) y 3) la detección y la distribución espacial de los rellenos sedimentarios. Este último aspecto aporta información básica para entender la formación de los yacimientos arqueológicos conocidos y proporciona nueva información sobre futuras áreas potenciales para la investigación. La prospección se localizó en el sector noroccidental de la Unidad de San Vicente, en donde se localiza el término de Torcas y los valles de Cueva Mayor, la Propiedad y Valhondo, entre los que se sitúan las cavidades de la Sierra de Atapuerca.

El resultado de esta investigación formó parte de la tesis doctoral de Ortega (2009) y fue publicado con detalle, describiendo los precedentes y características del método, así como sus aplicaciones previas al karst, en Ortega *et al.* (2010).

En esta ocasión incluimos también la superposición de todos los perfiles ERT y el trazado de las cavidades con la ortofofo, así como tres perfiles ERT que no fueron publicados en su momento.

La ERT aporta imágenes de las discontinuidades del subsuelo, documentando los contactos litológicos existentes y constituye un importante avance en los clásicos métodos geoeléctricos porque resuelve de forma automática el cambio manual de electrodos, facilitando el procesamiento y rápida gestión de un gran número de datos, lo que constituye un eficaz método, indirecto y no destructivo, para detectar las estructuras del subsuelo.

Contexto geológico y geomorfológico

Las características geológicas y geomorfológicas de la Sierra de Atapuerca han sido amplia y reiteradamente descritas en los trabajos de Pineda (1997), Benito (2004), Benito y Pérez-González (2007) y Benito *et al.* (2008) fundamentalmente, mientras que el endokarst de Atapuerca lo ha sido en Martín *et al.* (1981), Ortega *et al.* (2005), Ortega (2009) y Ortega *et al.* (2011). La cronología de sus diferentes rellenos sedimentarios puede

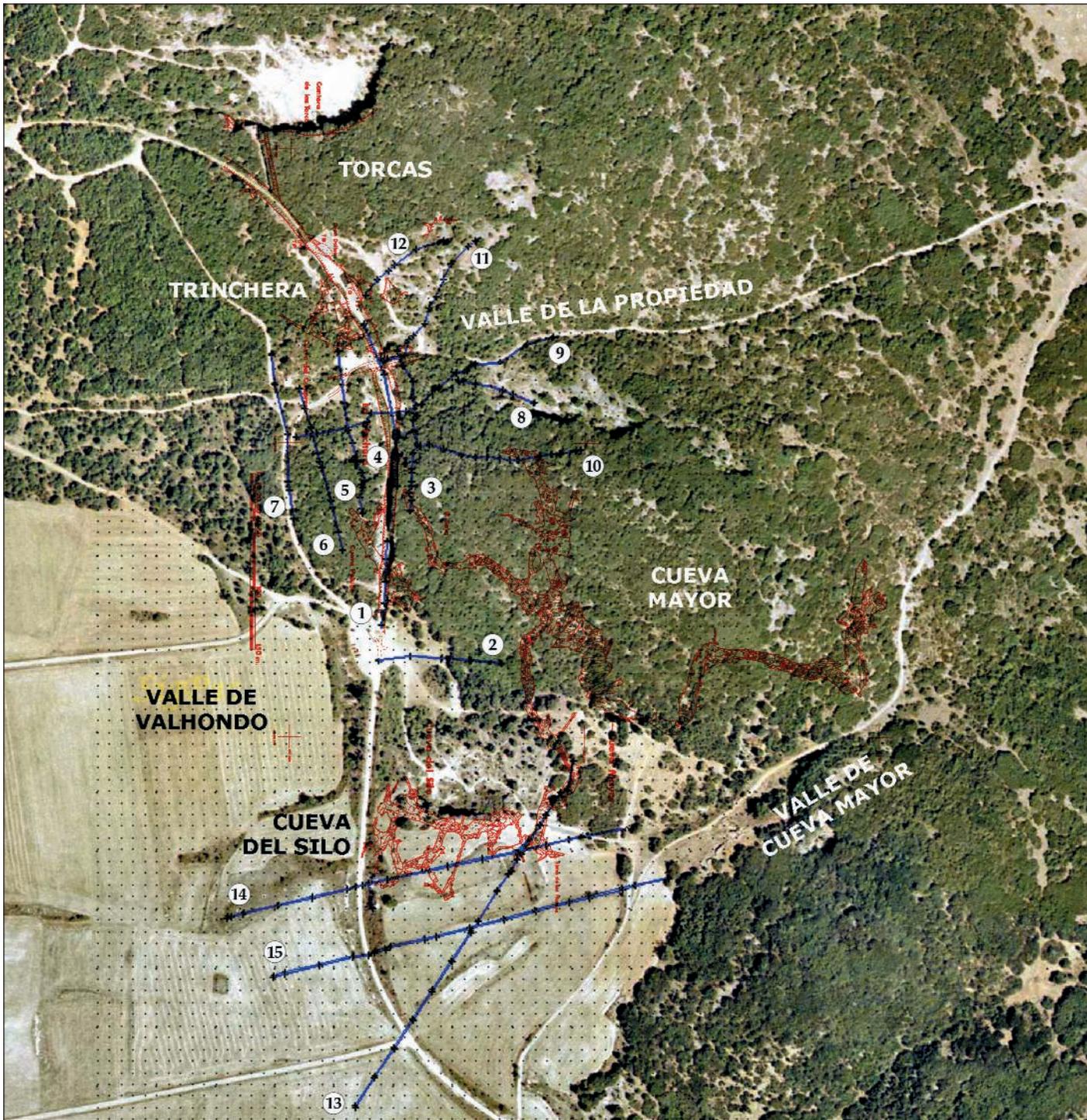


Figura 1. Situación de los perfiles ERT (azul) superpuestos a la topografía de las cavidades (rojo) y a la ortofoto del flanco sur de la Sierra de Atapuerca. (Montaje Miguel A. Rioseras)

consultarse en Parés y Pérez-González (1995); Pérez-González *et al.* (2001), Parés *et al.* (2006) y Bischoff *et al.* (2006), mientras que las características de sus principales yacimientos paleoantropológicos pueden consultarse en Arsuaga *et al.* (1993 y 1997) para la Sima de los Huesos, Bermúdez de Castro *et al.* (1997 y 1999) para Dolina, Carbonell *et al.* (1999) para Galería y Rosas *et al.* (2006) y Carbonell *et al.* (2008) para Elefante, entre otros muchos trabajos.

Metodología

Las prospecciones geofísicas representan métodos indirectos, útiles y eficaces para la obtención de información de las características del subsuelo. Entre los distintos métodos geoelectrónicos, la Tomografía de Resistividad Eléctrica (ERT) es uno de los métodos que se aplican en el conocimiento del potencial de los registros en arqueología e investigaciones kársticas, debido a su bajo costo y a la capacidad para estimar la profundidad y la geometría de las estructuras y su entorno, permitiendo el reconocimiento del terreno y la planificación de las investigaciones.

Los métodos geoelectrónicos consisten en el análisis de la distribución espacial de la resistividad eléctrica subterránea. Se realiza a través de un gran número de mediciones basadas en la ubicación de numerosos electrodos a una distancia equidistante, por lo general a lo largo de un perfil longitudinal recto, aunque también son posibles otras geometrías tales como cuadrículas y líneas en ángulo. La distancia entre los electrodos determina la resolución y profundidad de la prospección. Los electrodos están conectados simultáneamente al dispositivo de resistencia, que controla su actividad y su configuración, gracias a un programa secuencial específico (Porres, 2003). La geometría de los electrodos define el dispositivo, que puede ser variado, aunque los más comunes son Schlumberger-Wenner y Dipolo-Dipolo.

La Tomografía Eléctrica aporta imágenes de las discontinuidades del subsuelo, documentando los contactos litológicos existentes y constituye un avance importante en relación con los clásicos métodos geoelectrónicos porque resuelve de forma automática el cambio manual de los elec-

trodos, facilitando el procesamiento y rápida gestión de un gran número de datos. El objetivo de estas técnicas es determinar el valor de la resistividad eléctrica real y su distribución espacial, utilizando los valores de resistividad aparente obtenidos por medio de métodos convencionales de corriente directa. Los datos son procesados aplicando algoritmos que estiman un modelo teórico de la sección medida. Esta sección muestra la distribución continua de la resistividad del terreno, expresada por una escala de color. Las variaciones en la resistencia de valores registrados están relacionadas con las estructuras y características subterráneas y en consecuencia pueden ser interpretadas geológicamente (litología, contactos, fracturas, fallas, agua, cavidades, etc.).

A fin de interpretar correctamente las secciones de resistividad aparente, debe considerarse la interrelación entre los diversos factores clave que controlan la resistividad del terreno, tales como litología (especialmente arcillas), porosidad, saturación de agua y temperatura o salinidad. Además, debe tenerse en cuenta que diferentes configuraciones geológicas pueden proporcionar una respuesta eléctrica similar. Por estas razones, la interpretación de las secciones geofísicas debe ser apoyada por observaciones geológicas y perfiles de control que deben llevarse a cabo en zonas cuyas características geológicas son conocidas, a fin de obtener el comportamiento real de los materiales subterráneos y discontinuidades, lo que permitirá la comparación con otras secciones.

Resultados

La prospección ERT se llevó a cabo en el borde SO de la Sierra de Atapuerca, donde se localizan las entradas de cuevas ocupadas por homínidos durante el Pleistoceno. Las secciones se centraron en los valles de Valhondo, la Propiedad y Cueva Mayor y en el término de Torcas (figura 1). El número, distribución y características de estos perfiles geofísicos se muestran en la tabla 1. Las secciones se llevaron a cabo con el dispositivo de resistencia Switch72 SYSCAL R1 PLUS y se procesaron utilizando el software RES2DINV ver.3.42 (Locke, 1999). En cada sección, se han aplicado dispositivos Schlumberger-Wenner y Dipolo-Dipolo. La mayoría

Section N°	Distancia (m)	Espacio (m)	N° Intercciones	RMS (m)		Coordenadas (UTM H30N, ED50)					
				Schlumberger- Wenner	Dipolo -Dipolo	Primer electrodo			Último electrodo		
						X (m)	Y (m)	Z (m asl)	X (m)	Y (m)	Z (m asl)
1	53,0	1,0	5	2,5	6,8	457325	4688922	992	457323	4688870	994
2	108,0	1,5	5	3,2	14,3	457317	4688822	994	457420	4688819	1012
3	142,0	2,0	4	64,4	88,5	457336	4689079	998	457477	4688948	1014
4	142,0	2,0	3	32,1	39,6	457305	4689107	987	457333	4688970	990
5	142,0	2,0	3	60,2	67,0	457290	4689057	994	457306	4688975	1001
6	142,0	2,0	5	4,1	17,2	457256	4689035	992	457287	4688914	1000
7	142,0	2,0	4	56,6	56,4	457227	4689082	988	457241	4688941	990
8	142,0	2,0	5	7,5	19,0	457248	4689012	989	457369	4689052	1006
9	142,0	2,0	5	8,1	19,9	457248	4689012	989	457464	4689096	1012
10	142,0	2,0	5	2,6	5,9	457353	4689003	1007	457488	4690000	1038
11	106,0	2,0	3	44,9	56,8	457343	4689094	999	457399	4689178	1030
12	87,5	2,5	5	22,7	50,2	457307	4689132	1004	457372	4689177	1019
13	355,0	5,0	5	4,9	42,3	457482	4688736	1027	457280	4688442	1004
14	355,0	5,0	4	8,0	8,6	457190	4688603	998	457527	4688676	1016
15	355,0	5,0	5	3,2	23,2	457229	4688755	1004	457562	4688637	1017

Tabla 1. Características técnicas de las secciones de Tomografía Eléctrica de Resistividad tomadas en el flanco sur de la Sierra de Atapuerca.

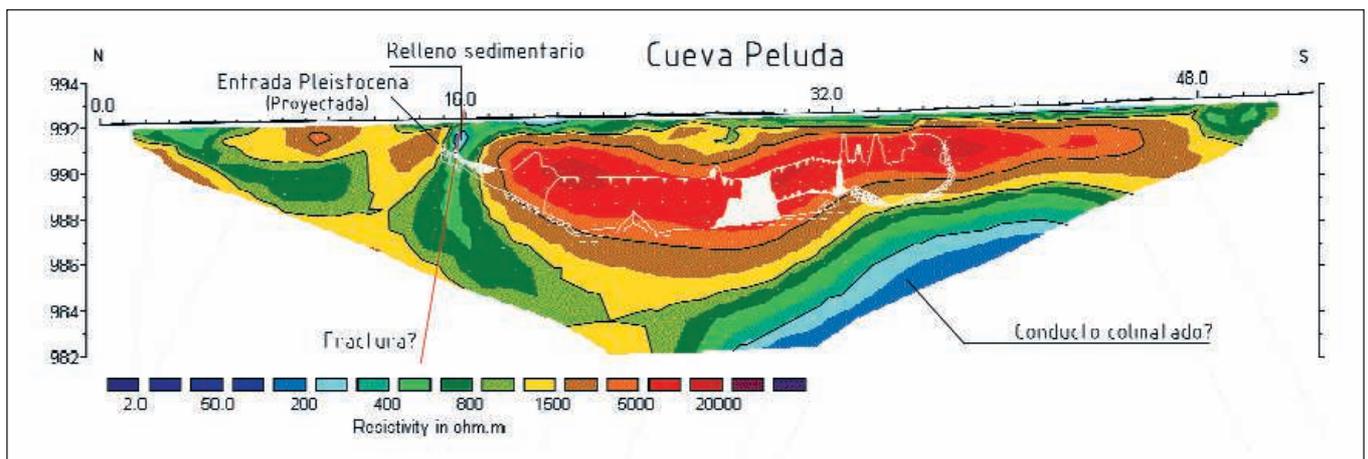


Figura 2. Perfil ERT sobre el conducto principal de Cueva Peluda (perfil 1). Los trazos blancos se corresponden con las paredes de la cueva

de los perfiles presentan resultados similares para ambos dispositivos, aunque en algunos difieren sustancialmente, especialmente en aquellos en los que se incrementa la profundidad de prospección (Athanasίου *et al.*, 2007). En estos casos, el Dipolo-Dipolo mostró los errores más altos (tabla 1). También los dispositivos Schlumberger-Wenner proporcionan imágenes más realistas según el perfil de control realizado sobre Cueva Peluda (figura 2), por lo que para la interpretación geofísica nos hemos basado principalmente en los datos aportados por este último dispositivo (Schlumberger-Wenner). A fin de facilitar la comparación entre las secciones de resistividades, la escala de colores fue estandarizada en todos los perfiles. Además, las secciones fueron dibujadas sin distorsión vertical,

para facilitar la georeferenciación entre la proyección de la topografía kárstica de los conductos y la imagen de resistividad eléctrica. El perfil de control se realizó sobre el conducto de Cueva Peluda al que se superpone el corte de Trincheras (figuras 1 y 2).

Interpretación y discusión

Para una mayor comprensión del trabajo, las imágenes de resistividades eléctricas fueron contrastadas con observaciones de campo, mapas geológicos y geomorfológicos 1:50.000 y 1:10.000 (Pineda, 1997; Benito, 2004) y estudios del endokarst elaborados a partir de una topografía espeleológica detallada (Ortega, 2009). Se realizó, además, una sección de control de la respuesta de la resistividad eléctrica de las cavidades, sedimen-

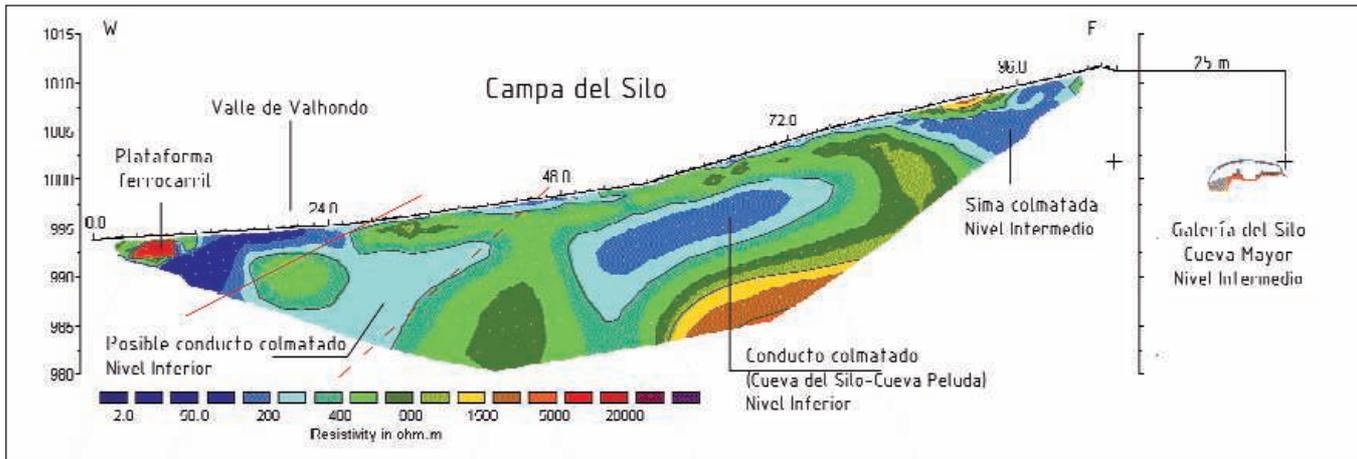


Figura 3. Perfil ERT sobre el Valle de Valhondo y la Campa del Silo (perfil 2).

tos y otros materiales, (figuras 1 y 2), situada sobre el tramo del conducto de Cueva Peluda que se desarrolla a escasa profundidad de la Trinchera del Ferrocarril. Esta sección mostró resultados similares en los dispositivos Dipolo-Dipolo y Schlumberger-Wenner y se caracteriza por presentar una estructura cerrada con alta resistividad (>1500 ohmm, figura 2) para el conducto de Cueva Peluda, ubicada apenas 1-2 metros bajo el suelo actual de la trinchera, entre 990 y 992m s.n.m. Esta estructura está rodeada de roca (calizas del Cretácico superior), definida por una amplia gama de resistividades (>400 ohmm), según su grado de fracturación, facies local y estratificación. En el perfil puede distinguirse una tercera zona con menor resistividad (<400 ohmm) que corresponde a materiales no consolidados y con mayor porosidad, relacionados con una antigua entrada colmatada de sedimentos, cuya morfología se intuye en el frente de la Trinchera.

1. Valle de Valhondo

El Valle de Valhondo se localiza al Oeste de los valles de la Propiedad y de Cueva Mayor, delimitando el borde de la sierra y el contacto con los materiales terciarios, en la cabecera del río Pico (figuras 1 y 3). Representaba el frente de descarga del paleokarst de Atapuerca (Ortega, 2011), y en su subsuelo se desarrollan, a unos 980-995m s.n.m., los conductos de Cueva del Silo y Cueva Peluda formando el nivel inferior del karst, caracterizado por la presencia en su interior de gravas fluviales del río Arlanzón, que evi-

dencian la interconexión de los conductos en un mismo nivel morfológico (983-985m s.n.m.). El objetivo de la prospección ERT era comprobar dicha conexión entre los pasajes, cuya formación y extensión era un aspecto clave para comprender los procesos post-deposicionales en el yacimiento de Elefante. La distribución de las gravas fluviales en las dos cavidades se explica por una pérdida directa desde el río Arlanzón hacia el endokarst (y hacia Valhondo) durante el Pleistoceno inferior-medio (Ortega *et al.*, 2005; Ortega, 2009).

En el perfil situado en la Campa del Silo distinguimos el contacto entre las calizas del Cretácico superior al Este y los sedimentos neógenos al Oeste (figura 3). En los sedimentos neógenos aparece una zona de alta resistividad, que coincide con el relleno correspondiente al antiguo ferrocarril y el actual camino de acceso. Sin embargo, en los sedimentos del Cretácico se detectaron tres zonas de baja resistencia a diferentes niveles. La mayor se encuentra al Este, a 1010m s.n.m., y se interpreta como un conducto colmatado y abierto al exterior por dos sectores. Este conducto se corresponde altimétricamente con el segundo nivel del endokarst y se localiza en una posición cercana a la Galería del Silo de Cueva Mayor. Las otras dos estructuras con resistividades bajas presentan una cota similar al nivel inferior del karst (990-996m s.n.m.) y fueron interpretadas como conductos colmatados desarrollados entre Cueva Peluda y Cueva del Silo. Uno de ellos presenta una morfología oval estrecha, mientras que el otro está abierto a

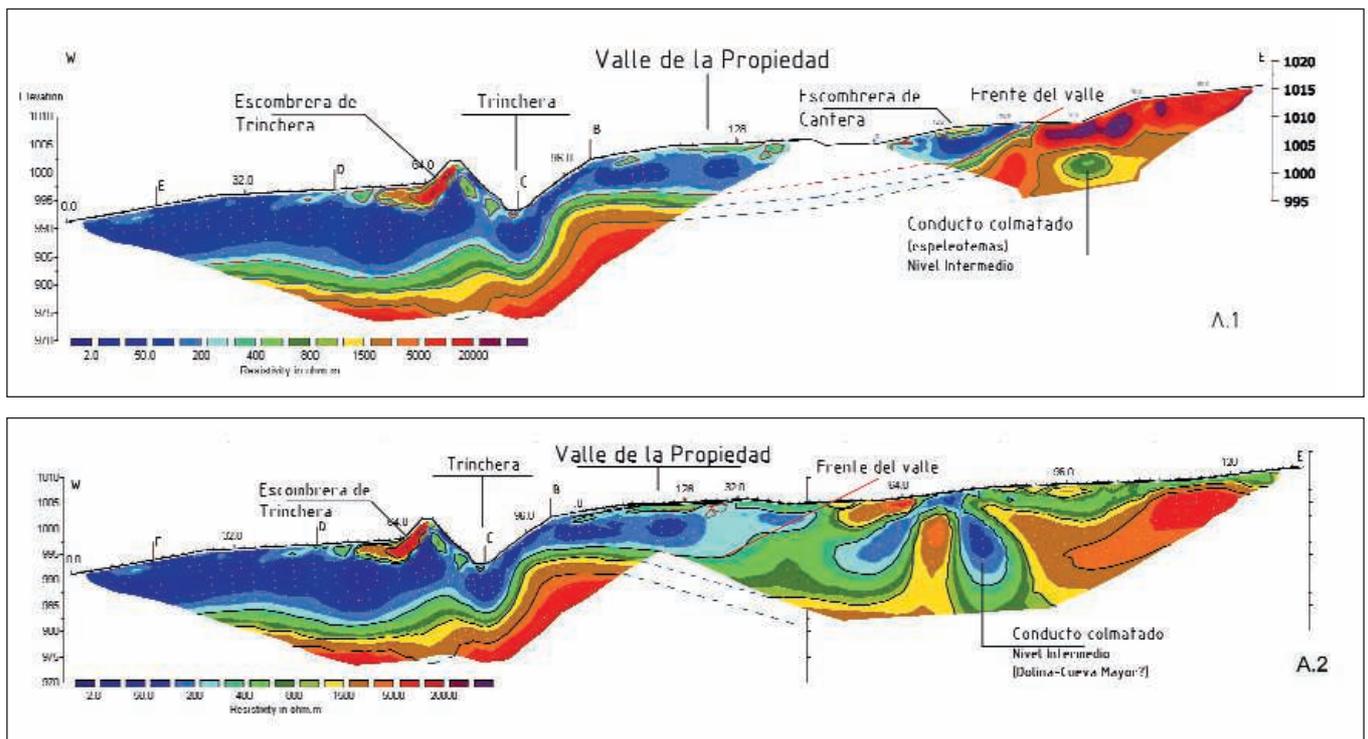


Figura 4. Perfiles ERT en el Valle de la Propiedad. (A.1 y A.2) Perfiles longitudinales (perfiles 8 y 9)

los sedimentos del Valle Valhondo (figura 3), de forma similar a los conductos detectados en el sondeo realizado en el Valle de Propiedad (ver más adelante).

2. Valle de la Propiedad

El Valle de la Propiedad se desarrolla en dirección Este-Oeste, desde el alto de San Vicente hasta el valle de Valhondo. Representa el límite Norte de los conductos conocidos de Cueva Mayor, y constituye una barrera entre esta cavidad y las cuevas de Trinchera, conocidas únicamente por los sectores de entrada, como Dolina y Galería (Martín *et al.*, 1981, Ortega *et al.*, 2011). En la margen sur de este valle se localiza el relleno de Elefante, tramo paleosurgente de la Galería Baja de Cueva Mayor que alberga un yacimiento con una secuencia arqueológica del Pleistoceno inferior-medio y fósiles humanos de *Homo sp.* de hace 1,1-1,2Ma (Carbó *et al.*, 2008).

En el espacio ocupado por el Valle de la Propiedad, incluyendo el yacimiento de Elefante, se efectuaron 5 perfiles ERT transversales y 2 longitudinales de unos 142m de longitud (figuras 1-perfiles 3/9-, 4 y 5), con la finalidad de estimar tanto la geometría subsuperficial de este valle

como del relleno del yacimiento de Elefante.

En relación con los perfiles longitudinales del valle de la Propiedad, dado que su tramo superior incide en calizas del Cretácico superior, su imagen geofísica muestra valores muy resistivos propios de las calizas (400-5000 ohm) (figuras 1 y 4) y documenta la presencia, a cotas de 1000 y 1010m de altitud, de anomalías circulares, con valores de resistividad media (400-800 ohm). La forma y posición de esta estructura se relaciona con la sección de un conducto perteneciente al segundo nivel del karst colmatado con sedimentos, cuyos valores de resistividad plantean la posibilidad de que se trate de espeleotemas. El perfil del valle continúa marcando un escalón en las calizas de unos 6m, relleno con sedimentos terrígenos hasta la base y desembocadura del arroyo, cuyos valores de resistividad son inferiores a 400 ohm, y caracterizan un valle colmatado cuyo lecho calizo se encaja unos 10-15m de profundidad en el sector de confluencia con el valle de Valhondo (figura 4).

Entre los perfiles transversales, el situado justo sobre el frente Este de Trinchera y sobre el yacimiento de Elefante

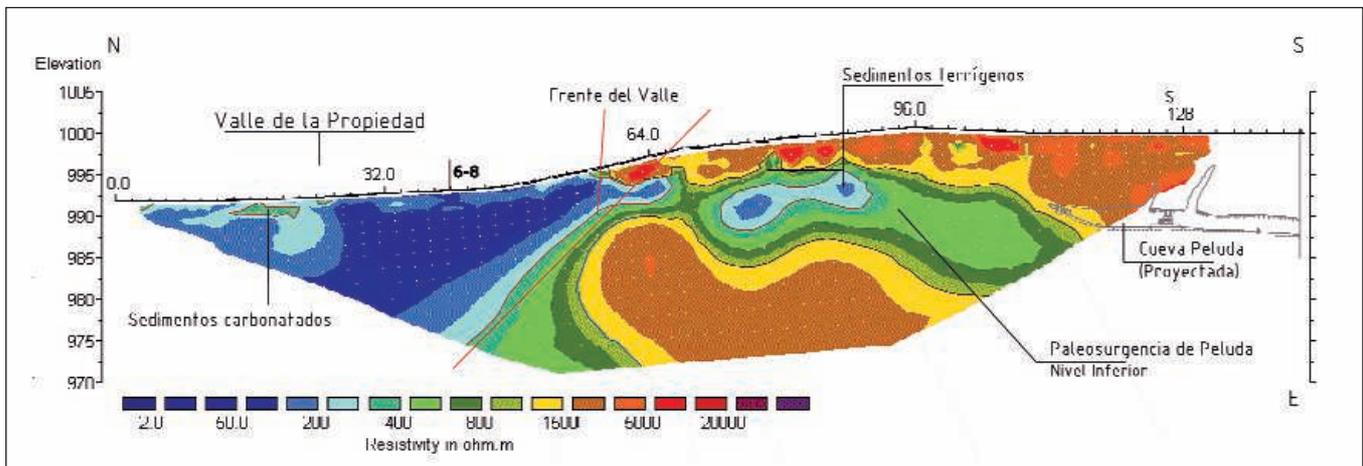
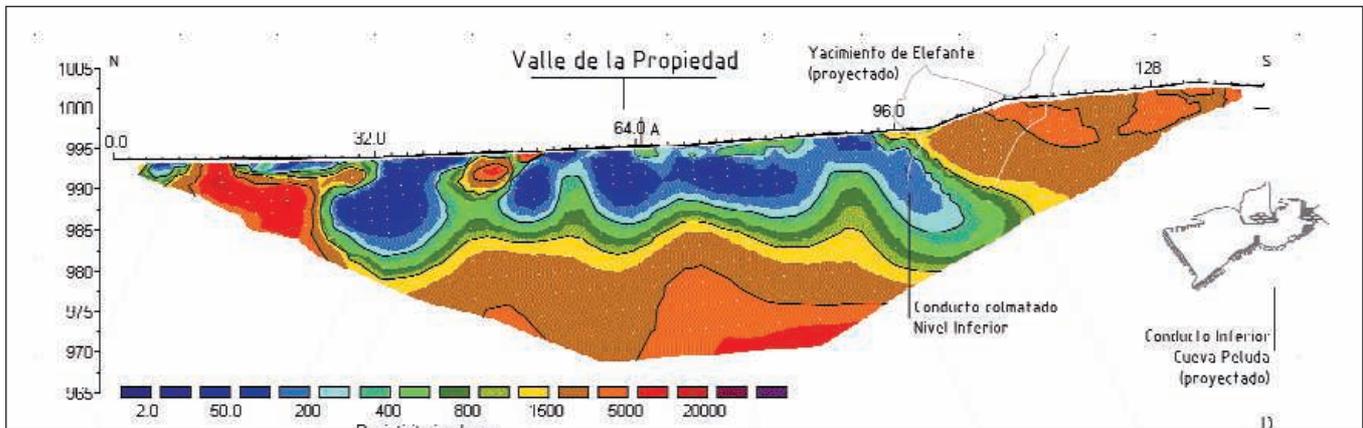
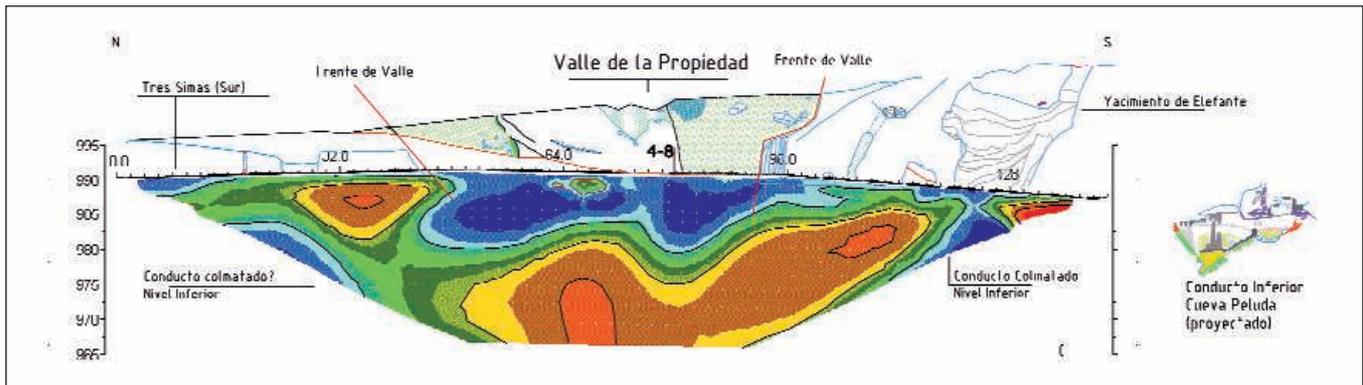
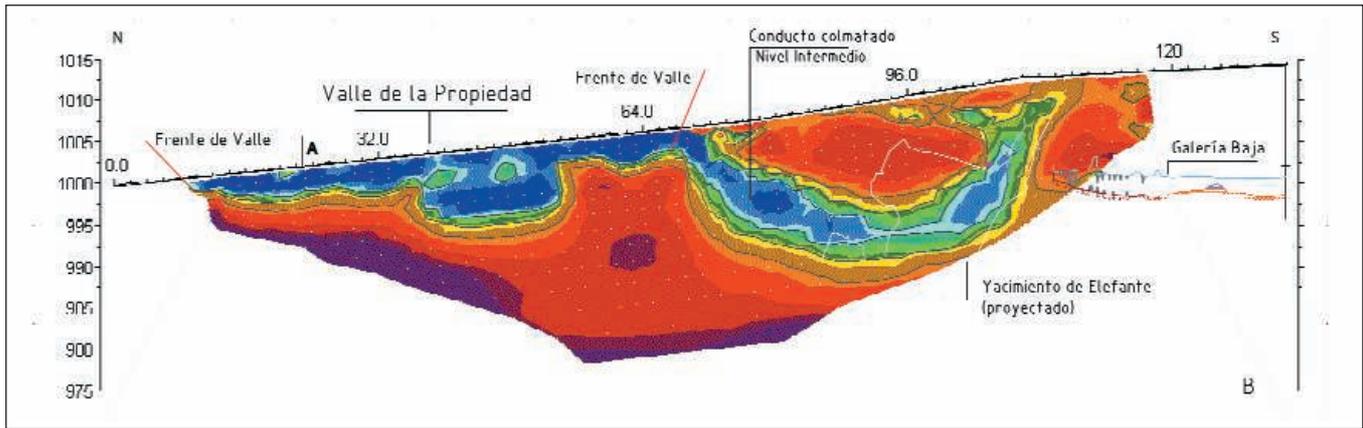


Figura 5. Perfiles ERT en el Valle de la Propiedad. B-E) Perfiles transversales (perfiles 3 a 6).

(figura 1, perfil 3, y 5B) muestra la existencia de un conducto, totalmente colmatado con sedimentos terrígenos poco resistivos (<400 ohmm) y con apertura al valle de la Propiedad. Los datos geomorfológicos indican que este conducto correspondería a la continuación de Galería Baja-Elefante (Cueva Mayor) perteneciente al segundo nivel del karst, capturado por la incisión del valle y rellenado por sus sedimentos. Dicha conexión con el valle, sugiere que por esta entrada pudieron penetrar algunos de los sedimentos aluviales y coluviones, tales como las margas y las facies fluviales, observados en los niveles TE15-17 de Elefante (Rosas *et al.*, 2006, Benito Calvo y Pérez-González, 2007; Ortega, 2009).

El perfil geofísico desarrollado en la base de Trinchera (figura 1, perfil 4, y 5C) se realizó para conocer la base del yacimiento de Elefante y la profundidad y características del valle de la Propiedad, con el fin de poder establecer las relaciones entre las cavidades Cueva Mayor y Cueva Peluda con las de Galería, Dolina y Compresor. La imagen de este perfil muestra como la base del yacimiento de Elefante está conectada con una estructura cerrada, que aparece colmatada con sedimentos terrígenos de baja resistividad (50-300 ohmm) (figura 5C). Esta estructura se relaciona con la cavidad detectada en la perforación realizada en la base de Elefante, en donde se documentó la existencia de gravas de una terraza interior (Rosas *et al.*, 2006; Ortega *et al.*, 2011). Este conducto y sus gravas están en conexión con la Galería Inferior de Cueva Peluda, y con los conductos de Cueva del Silo (todos ellos del nivel inferior del Karst) en donde las gravas, cantos de cuarcita y arenas indican una entrada directa del Arlanzón y una importante reactivación kárstica. Dicho evento ocasionaría importantes procesos erosivos y habría favorecido los consecuentes procesos de vaciados, rellenos y deformación de gran parte de los niveles de este yacimiento (Rosas *et al.*, 2001; Ortega 2009).

El tramo central del perfil de Trinchera ha puesto al descubierto la parte superior de la sección del Valle de la Propiedad, cuyo relleno terrígeno está compuesto de margas, arenas, arcillas y gravas carbonatadas, organizadas en varias unidades separadas por discontinuidades (Benito,

2004). La imagen ERT muestra la presencia de sedimentos con valores de resistividad baja, que se extienden en profundidad hasta los 980-983m s.n.m., alcanzando un espesor total de 20-24m (figura 5C), que colmatan un profundo valle (a modo de cañón), que individualiza y corta claramente los conductos del nivel intermedio desarrollados a ambas márgenes del valle (Galería Baja-Elefante en la margen sur y Galería y Dolina en la margen norte). Esta profunda incisión contrasta además con los perfiles y secciones del resto de los valles de la Unidad de San Vicente, que no contienen sedimentos y son superficiales (Benito Calvo *et al.*, 2008).

Una característica documentada en todos los perfiles del Valle de la Propiedad es la presencia en el lecho calizo de concavidades y escalones bajo el relleno sedimentario (figuras 4, 5B, 5C y 9). Estas depresiones se vinculan altimétricamente con los diferentes niveles de conductos, por lo que parece sugerir un claro origen endokárstico, en relación con diferentes fases del proceso de incisión del valle. Las depresiones generadas por la captura de estas cavidades habrían facilitado la sedimentación de una potente secuencia sedimentaria durante el aumento del nivel de base, en relación con una posterior fase regional de agradación fluvial. Además, la presencia de cavidades rellenas y capturadas por la incisión del arroyo de la Propiedad insinúan la posible conexión entre Cueva Mayor-Cueva del Silo y las cavidades de Galería y Dolina (figura 9), asociadas con fases de transición del nivel superior al intermedio (Ortega *et al.*, 2010). Aguas abajo de Trinchera la morfología del fondo del valle sugiere de nuevo la captura de cavidades del tercer nivel endokárstico (figuras 5C y 5D). Los bordes calizos del valle indican marcadas depresiones semicirculares, actualmente rellenas con materiales terrígenos de baja resistividad. A la misma cota y en la margen sur del Valle de la Propiedad (figuras 5E y 9), se detectó otra estructura alargada, de baja resistividad, abierta hacia los sedimentos del valle que interpretamos como la prolongación del conducto principal de Cueva Peluda que actualmente finaliza colmatado. Estos conductos parecen haber funcionado como paleosurgencias durante el Pleistoceno inferior-medio,

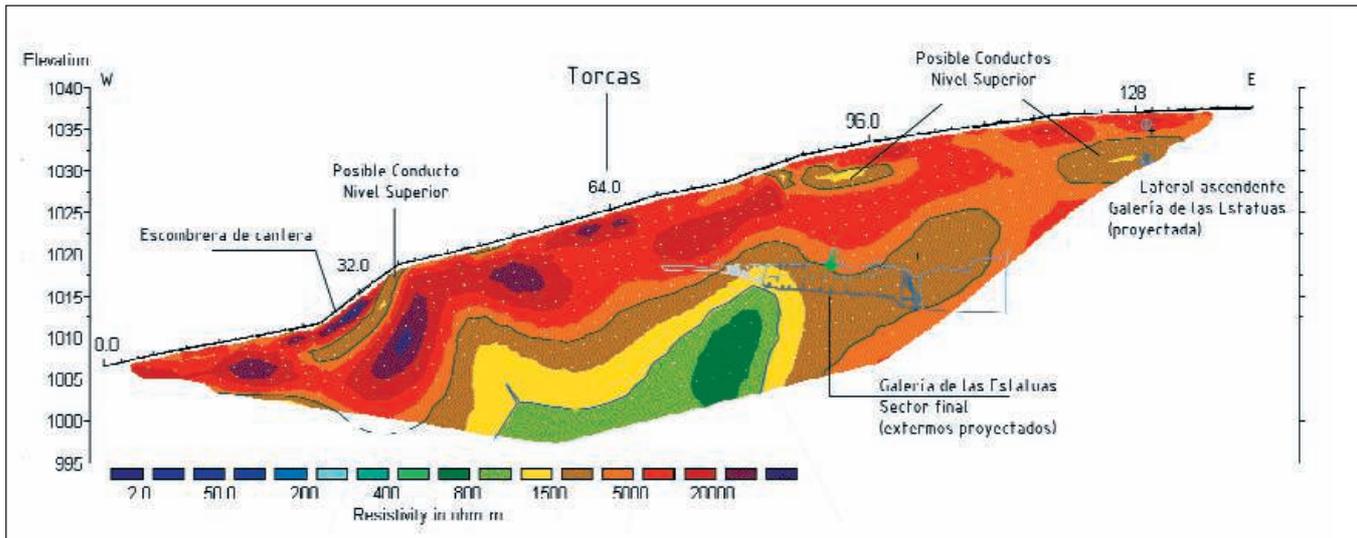


Figura 6. Perfil ERT al sur del Valle de la Propiedad, en dirección E-W sobre el final de la Galería de las Estatuas (perfil 10).

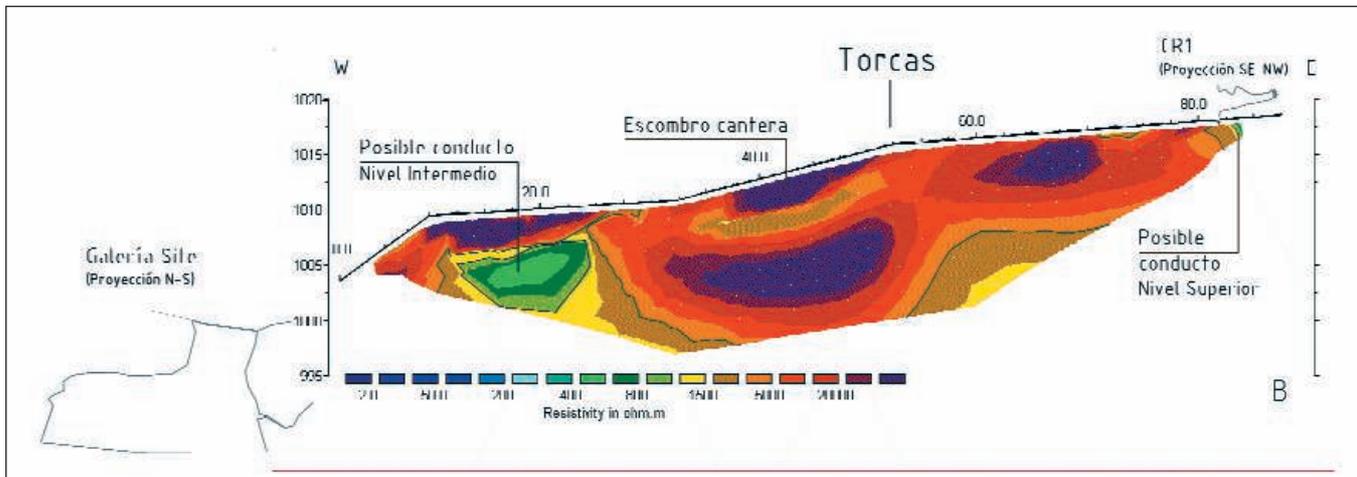
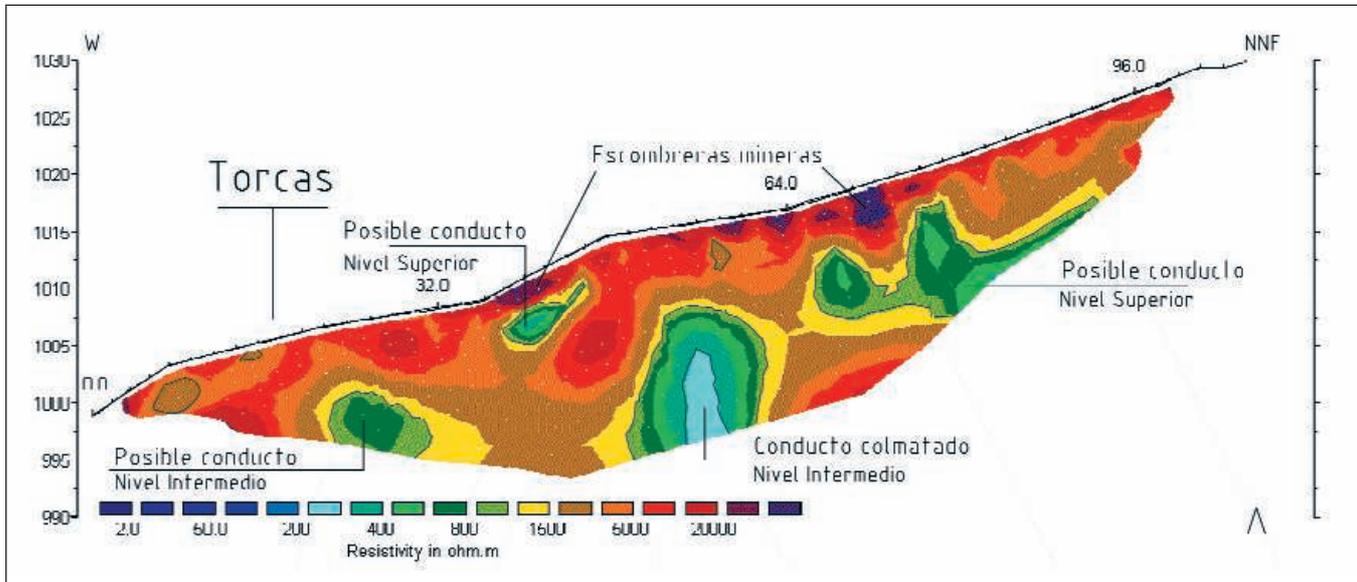


Figura 7. Perfiles ERT del término de Torcas, próximos a los yacimientos de Dolina y Galería (perfiles 11 y 12).

cuando el nivel freático era más elevado.

3. Al Sur del Valle de la Propiedad

Al sur del Valle de la Propiedad, sobre el tramo final del conducto de la Galería de Estatuas de Cueva Mayor se realizó un perfil eléctrico que tenía como objeto disponer de una secuencia de discontinuidades que permitiese ubicar la situación de la antigua entrada, en la actualidad colmatada. El perfil (figuras 1, perfil 10, y 6) ha proporcionado una imagen coherente con las proporcionadas en el tramo superior de los perfiles longitudinales del Valle de la Propiedad (figura 4), con la presencia del substrato calizo (resistividades superiores a los 5000 ohmm). Al superponer la imagen de resistividades con el perfil topográfico de la Galería de las Estatuas destaca la falta de resolución del conducto, aunque se observa cierta relación con una anomalía con valores de 800-3000 ohmm. Este hecho puede deberse a tanto a la profundidad a la que se sitúa el conducto (entre 12 y 17m), como a sus moderadas dimensiones con anchuras medias del tramo final de unos 8-10m de ancho por unos 2-5m de alto, así como al espaciado entre electrodos elegido, 2m, que no aporta precisión en profundidad.

4. Término de Torcas

El sector de Torcas situado al norte del Valle de Propiedad se caracteriza por presentar un inaccesible sistema de cavidades (figuras 1, perfiles 11-12, y 7), en el que se localizan los yacimientos del Pleistoceno inferior y medio de Dolina y Galería (Bermúdez de Castro *et al.*, 1999; Carbonell *et al.*, 1999). Estos yacimientos constituyen antiguas entradas de cuevas, que fueron ocupadas y colmatadas a lo largo del Pleistoceno (Pérez González *et al.*, 2001). Actualmente, estos yacimientos están expuestos por las obras de la Trinchería del ferrocarril minero de la Sierra. En este sector, el objetivo de la prospección ERT fue caracterizar el desarrollo y la ubicación de los conductos kársticos detectados en Trinchería, con el fin de conocer y determinar la extensión de los yacimientos de Dolina y Galería. Los perfiles de este sector (figuras 1, 7A y 7B) indican unos valores de alta resistividad (>3000 ohmm) correspondientes a las calizas cretácicas de la sierra y a la acu-

mulación de las escombreras de las antiguas canteras, cuya actividad extractiva en la zona se remonta al siglo XIII.

Es interesante señalar que dentro de las calizas se evidencian varias estructuras cerradas con valores de resistividad media (400-1000 ohmm) que hemos interpretado como pequeñas cavidades, en algunos casos, los valores obtenidos pueden apuntar a conductos colmatados con espeleotemas (figura 7). Los valores de resistividad bajos se relacionan con una gran estructura cerrada (200 ohmm), detectada en la parte central del perfil 11 (figura 7A), y se ha descrito como un conducto que contiene sedimentos terrígenos. Todos estos conductos se desarrollan a la misma cota del segundo nivel del endokarst, representando la continuación de las cavidades de Dolina y Galería (figura 7B), que estarían asociadas a un nivel de transición entre la Galería de las Estatuas del primer nivel y el segundo nivel del karst (Dolina) (figura 9), probablemente relacionado con un encajamiento, ya en las proximidades de la zona surgente (Ortega *et al.*, 2005; Ortega 2009).

5. Valle de Cueva Mayor

Este valle se desarrolla desde el Alto de San Vicente, en la meseta superior de la Sierra de Atapuerca, hasta el Valle del Arlanzón, erosionando primero las calizas y dolomías del Cretácico superior y luego los sedimentos aluviales y lacustres del Mioceno de la Cuenca del Duero. Todas las galerías documentadas en este valle se desarrollan en su margen derecha, donde se localiza el Sistema Cueva Mayor-Cueva del Silo que contiene importantes rellenos sedimentarios relacionados con eventos freáticos y vadosos, seguidos por fases inactivas, asociadas a la formación de espeleotemas y al uso de las cavidades (Arsuaga *et al.*, 1997; Bischoff *et al.*, 1997). Los perfiles geofísicos se llevaron a cabo en la margen derecha del valle (figura 1, perfiles 13-15, y 8), con el objetivo de analizar la estructura geológica responsable de la distribución de los conductos y detectar la posible presencia de las antiguas entradas, hoy colmatadas, utilizadas por los osos y homínidos localizadas en el entorno de la Sima de los Huesos y la Sala de los Cíclopes.

Con el fin de descubrir dicha red de conductos, desarrollados a una profundi-

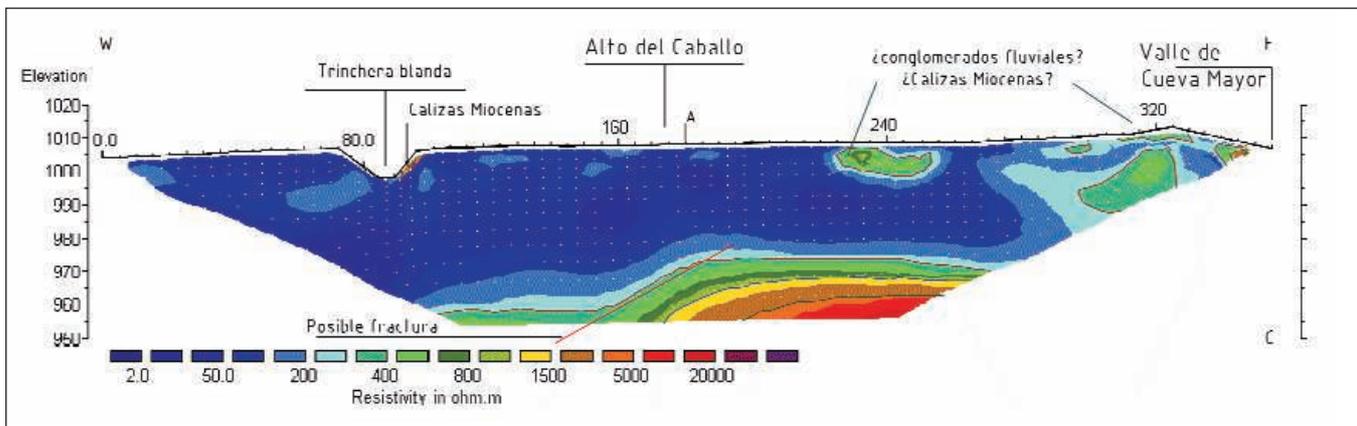
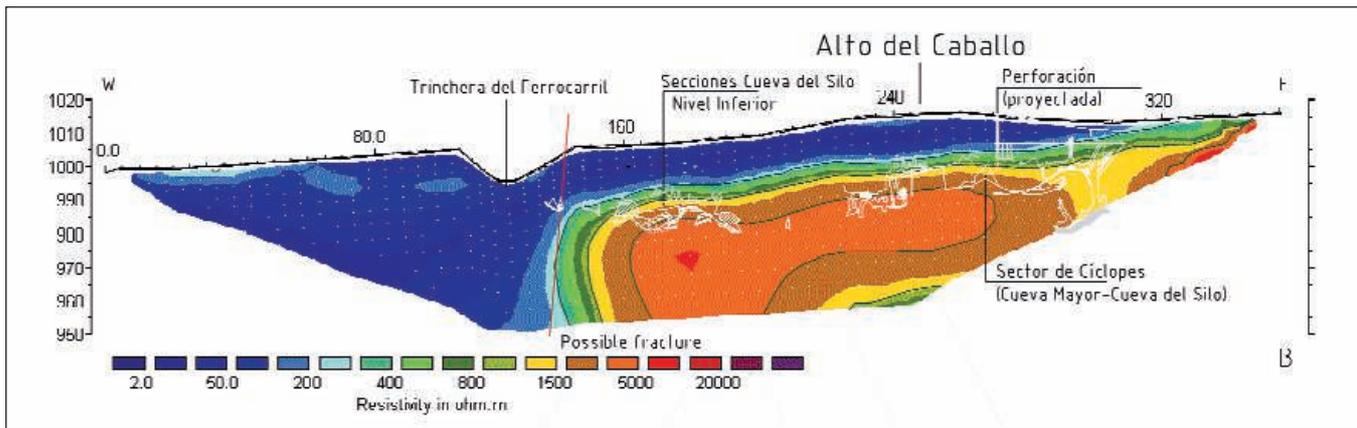
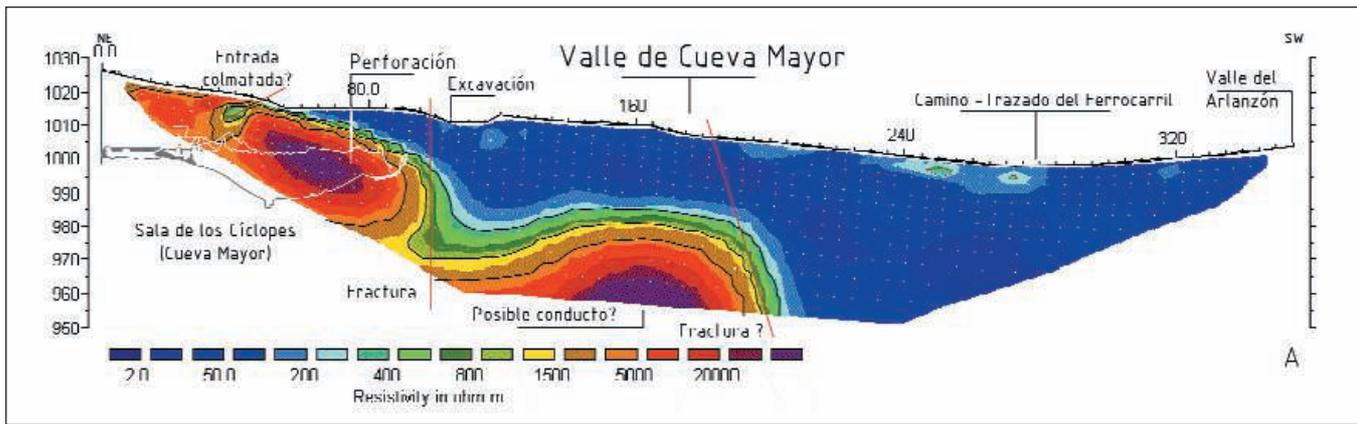


Figura 8. Perfiles ERT en el Valle de Cueva Mayor (perfiles 13 a 15).

dad media de unos 20-40m, tuvimos que aumentar la longitud del perfil ERT, así como la distancia entre sus electrodos (tabla 1). La imagen resultante revela un nítido contacto entre las calizas cretácicas (resistividades >400 ohm) y las margas miocenas (<40 ohm) (figuras 1, perfiles 13-15, y 8). El contacto entre las unidades geológicas muestra la presencia de marcados escalones, que interpretamos como fallas. El escalón mayor fue detectado en

dos perfiles a cota 985m s.n.m., con un salto superior de 35m y el inferior situado a cotas de 975m del altitud (figuras 8). Estos saltos marcan un contacto abrupto entre las calizas cretácicas y los materiales de la secuencia del Neógeno, que en la zona de estudio corresponden a margas, arcillas y evaporitas del Mioceno inferior (figuras 8B y 8C). Dichos sedimentos están recubiertos por la unidad del Mioceno medio que aflora en el corte

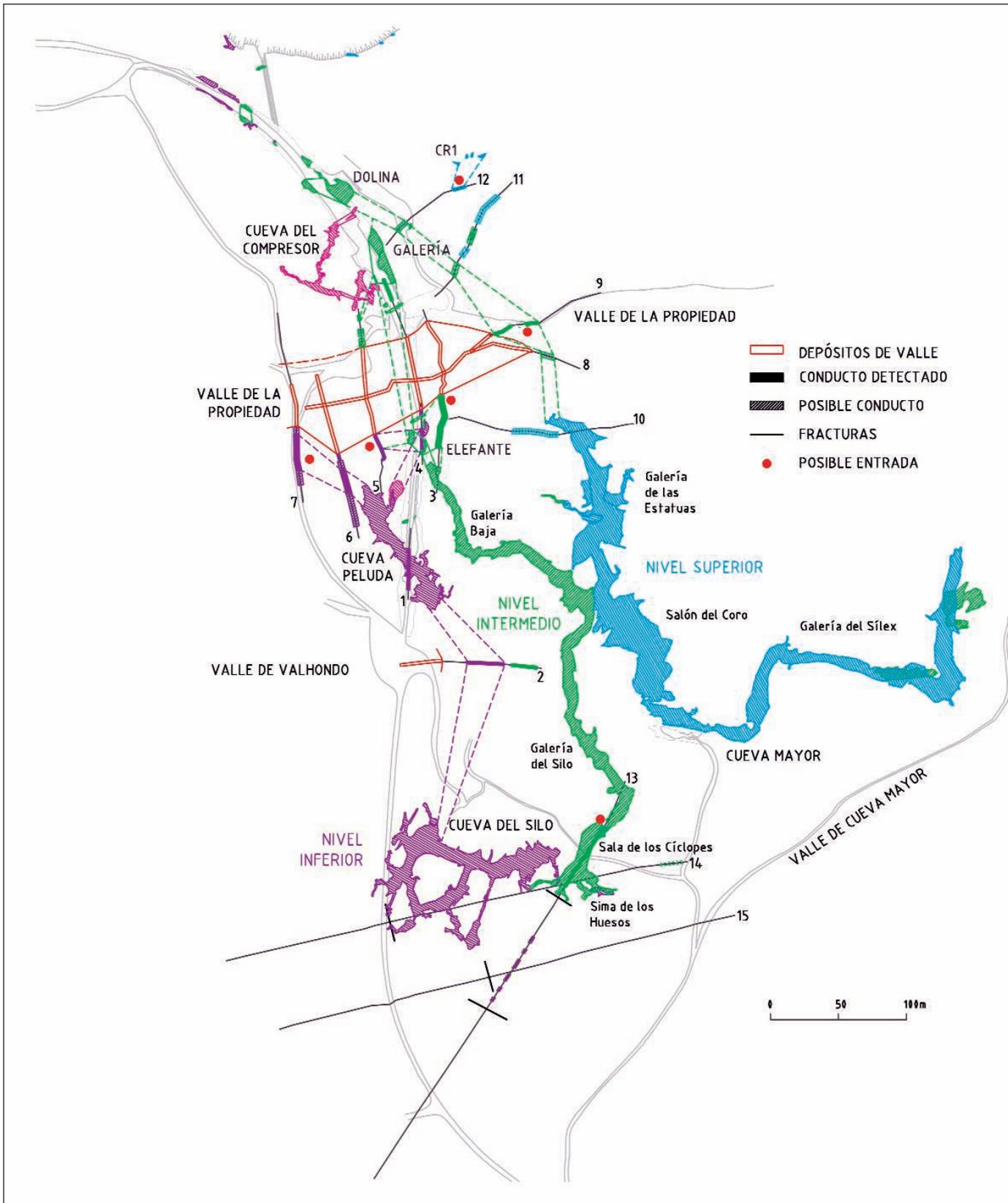


Figura 9. Perfiles ERT superpuestos a la topografía del endokarst de la Sierra de Atapuerca, con indicación de las posibles entradas y relaciones entre conductos detectados en este estudio.



**Perfil ERT Nº 2
en Campa del Silo**
Foto M. A. Martín

de la Trinchera, en donde se observan fallas menores y un paleorelieve colmatado por una brecha de cantos calizos cretácicos, que presenta una pendiente gradual de 8-9° de este a oeste (figura 8B), similar a la pendiente media de 7° que registran los sedimentos del Mioceno medio en este flanco de la Sierra de Atapuerca (Benito Calvo *et al.*, 2008).

La mayor longitud de estos perfiles ERT y la separación entre electrodos, necesaria para aumentar la profundidad de la prospección, afecta a la resolución obtenida, impidiendo la detección de pequeños conductos y posibles entradas. Sólo los conductos de mayor volumen se reflejan en este tipo de perfiles, aunque con forma imprecisa, como sucede con la Sala de los Cíclopes, que presenta un volumen de 16.168m³ (figuras 1, 8A y 9). Sin embargo, estos perfiles ERT han permitido confirmar que los conductos kársti-

cos se originan en las calizas cretácicas (figuras 8A y 8B), en el contacto con los sedimentos neógenos impermeables que impiden los procesos de karstificación hacia la margen izquierda del Valle de Cueva Mayor (figura 9). Este origen parece realizarse a través de fallas muy próximas al Valle del Arlanzón, que habría jugado un papel fundamental en la génesis del karst en relación con un origen hipogénico a favor del ascenso de las aguas confinadas a partir de pozos-chimeneas ascendentes relacionados con la fracturación y la tectónica detectada en este sector (Ortega, 2009; Ortega *et al.*, 2011).

Conclusiones

La Tomografía de Resistividad Eléctrica (ERT) ha sido un método geofísico no destructivo muy útil para revelarnos imágenes del endokarst más superficial del flanco sur de la Sierra de Atapuerca, cuyas entradas fueron ocupadas por los homínidos del Pleistoceno inferior y medio. El contraste con la información de los mapas geológicos y geomorfológicos y espeleológicos, tanto superficiales como del endokarst, es esencial para reducir la incertidumbre de la interpretación geofísica. La prospección ERT de alta resolución hizo posible detectar y analizar las estructuras relacionadas con la continuidad de algunas galerías, así como sus morfologías y geometrías, tipología y espesor de rellenos sedimentarios y localización de antiguas entradas hoy colmatadas. La prospección a cotas más profundas fue adecuada para evidenciar el contacto entre estructuras litológicas muy diversas y su vinculación con la génesis del endokarst.

El análisis de esta información aporta datos nuevos e importantes acerca de la configuración y evolución geodinámica de este endokarst. Los conductos del segundo y tercer nivel del karst se desarrollan a partir de las fallas detectadas en estos perfiles próximas al Valle del Arlanzón, evolucionando hacia el norte y finalizan en la confluencia del Valle de la Propiedad con el Valle de Pico. Un subnivel inferior se detectó en Elefante, correlacionando la presencia de su facies fluvial con el colapso de las unidades estratigráficas inferiores. La prospección geofísica nos permitió inferir la correlación entre redes

de galerías aparentemente aisladas, como la Cueva del Silo y Cueva Peluda (tercer nivel), o entre los conductos de la Galería Baja-Elefante y Galería-Dolina (segundo nivel). El desarrollo del karst hacia el norte está seccionado parcialmente por el Valle de la Propiedad, cuya incisión durante el Pleistoceno ha capturado varias galerías que representan potenciales nuevos yacimientos. Este trabajo ha sido fundamental para conocer la distribución de yacimientos arqueológicos en la zona y planificar su futura investigación.

Agradecimientos

Este trabajo fue apoyado por los proyectos de investigación BXX2000-1258-03-02, BOSS2003-08938-C03-01 y CGL2006-13532-C03-02 de la DGICYT y la Junta de Castilla y León. Los autores desean agradecer al Equipo de Investigación de Atapuerca (EIA) y al Grupo Espeleológico Edelweiss su constante apoyo logístico y científico.

Bibliografía

- Arsuaga, J. L., Martínez, I., Gracia, A., Carretero, J. M. y Carbonell, E. (1993): Three new human skulls from the Sima de los Huesos site in Sierra de Atapuerca, Spain. *Nature* 362: 534-537.
- Arsuaga, J. L., Martínez, I., Gracia, A., Carretero, J. M., Lorenzo, C., García, N. y Ortega, A. I. (1997). Sima de los Huesos (Sierra de Atapuerca, Spain). The site. *Journal of Human Evolution* 33(2/3): 109-127.
- Athanasiou, E. N., Tsourlos, P. I., Papazachos, C. B. y Tsokas, G. N. (2007). Combined weighted inversion of electrical resistivity data arising from different array types. *Journal of Applied Geophysics* 62: 124-140.
- Benito, A. (2004): *Análisis geomorfológico y reconstrucción de paleopaisajes neógenos y cuaternarios en la Sierra de Atapuerca y el valle medio del río Arlanzón*. Tesis Doctoral, Universidad Complutense, Madrid, 381 pp, ISBN 84-669-2585-6.
- Benito-Calvo, A. y Pérez-González, A. (2007). Erosion surfaces and Neogene landscape evolution in the NE Duero Basin (North-Central Spain). *Geomorphology* 88: 226-241.
- Benito-Calvo, A., Pérez-González, A. y Parés, J. P. (2008). Quantitative recon-

struction of late Cenozoic landscapes: a case study in the Sierra de Atapuerca (Burgos, Spain). *Earth Surface Processes and Landforms* 33: 196-208.

- Bermúdez de Castro, J. M., Arsuaga, J. L., Carbonell, E., Rosas, A., Martínez, I. y Mosquera, M. (1997). A hominid from the Lower Pleistocene of Atapuerca, Spain: possible ancestor to Neandertals and modern human. *Science* 276: 1392-1395.
- Bermúdez de Castro, J. M., Carbonell, E. y Arsuaga, J. L. (Eds.) (1999): Gran Dolina Site: TD6 Aurora Stratum (Burgos, Spain). *Journal of Human Evolution* 37 (3/4): 309-700.
- Bischoff, J. L. ; Fitzpatrick, J. A.; León, L.: Arsuaga, J. L.; Falguères, C.; Bahain, J. J. y Bullen, T. (1997): Geology and preliminary dating of the hominid-bearing sedimentary fill of the Sima de los Huesos Chamber, Cueva Mayor of the Sierra de Atapuerca, Burgos, Spain. *Journal of*

Perfil ERT Nº 4
por la base de la Trinchera.
Foto M. A. Martín



Human Evolution, 33: 129-154.

- Bischoff, J. L., Williams R. W., Rosenbauer, R. J., Aramburu, A., Arsuaga, J. L., Gracia, N. y Cuenca-Bescós, G. (2006). High-resolution U-series dates from the Sima de los Huesos hominids yields 600 + infinito/- 66 kyrs: implications for the evolution of the early Neanderthal lineage. *Journal Archaeological Science* 34: 763-770.
- Carbonell, E., Rosas, A. y Díez, J. C. (Eds) (1999). Atapuerca: Ocupaciones humanas y paleoecología del yacimiento de Galería, *Arqueología en Castilla y León* 7. Ed. Junta de Castilla y León. Zamora. 390 pp.
- Carbonell, E., Bermúdez de Castro, J. M., Parés, J. M., Pérez-González, A., Cuenca-Bescós, G., Ollé, A., Mosquera, M., Huguet, R., Made J. van der, Rosas, A., Sala, R., Vallverdú, J., García, N., Granger, D. E., Martín-Torres, M., Rodríguez, X. P., Stock, G. M., Vergès, J. M., Allue, E., Burjachs, F., Cáceres, I., Canals, A., Benito, A., Díez, C., Lozano, M., Mateos, A., Navazo, M., Rodríguez, J., Rosell, J. y Asuaga, J. L. (2008). The first hominin of Europe. *Nature* 425: 465-470.
- Loke, M. H. (1999): *RES2DINV ver. 3.42, Geoelectrical Imaging 2D & 3D, User Manual*.
- Martín, M. A., Domingo Mena, S. y Antón Palacios, T. (1981). Estudio de las cavidades de la zona BU-IV.A (Sierra de Atapuerca). *Kaite, Estudios de Espeleología Burgalesa* 2: 41-76.
- Ortega, A. I., Pérez-González, A., Martín, M. A., Carretero, J. M. y Arsuaga, J. L. (2005). El Sistema de Cueva Mayor-Cueva del Silo. Un estudio morfológico del endokarst de la Sierra de Atapuerca (Burgos, España). En M. Santonja y A. Pérez-González (Eds), *Geoarqueología y Patrimonio en la Península Ibérica y el entorno Mediterráneo*, 161-179.
- Ortega, A. I. (2009). *Evolución geomorfológica del Karst de la Sierra de Atapuerca (Burgos) y su relación con los yacimientos pleistocenos que contiene*. Tesis Doctoral, Universidad de Burgos, Burgos, 624 pp. I Anexo Documentación Planimétrica (11 mapas, 12 perfiles longitudinales, 91 secciones transversales).
- Ortega, A. I.; Benito-Calvo, A.; Porres, J.; Pérez-González, A. y Martín, M. A. (2010): Applyin Electrical Resistivity Tomography to the identification of Endokarstic Geometries in the Pleistocene Sites of the Sierra de Atapuerca (Burgos, Spain). *Archaeological Prospection*, 17: 233-245.
- Ortega Martínez, A. I.; Pérez González, A.; Benito Calvo, A. y Martín Merino, M. A. (2011): El Karst de la Sierra de Atapuerca. Estudio Geomorfológico. *Cubía*, 15: 70-88.
- Parés, J. M. y Pérez-González, A. (1995). Paleomagnetic age for hominid fossils at Atapuerca archaeological site, Spain. *Science* 269: 830-832.
- Parés, J. M., Pérez-González, A., Rosas, A., Benito, A., Bermúdez de Castro, J. M., Carbonell, E. y Huguet, R. (2006). Matuyama-age lithic tools from the Sima del Elefante site, Atapuerca (Northern Spain). *Journal of Human Evolution* 50: 163-169.
- Pérez-González, A., Parés, J. M., Carbonell, E., Aleixandre, T., Ortega, A. I., Benito, A. y Martín-Merino, M. A. (2001). Géologie de la Sierra de Atapuerca et stratigraphie des remplissages karstiques de Galería et Dolina (Burgos Espagne). *L'Anthropologie* 105-1: 27-44.
- Pineda, A. (1997). Mapa Geológico de España escala 1:50.000, 2ª Serie (MAGNA). Hoja de Burgos, 200 (19-10). IGME, Madrid, 93 pp.
- Porres, J. A. (2003). *Caracterización de cavidades en el subsuelo mediante la interpretación de perfiles de Tomografía Eléctrica*. Tesis Doctoral, Publisher: Universidad de Burgos, Burgos, Spain. ISBN:9788496394551. 343-346.
- Rosas, A., Pérez-González, A., Carbonell, E., Made J. van der, Sánchez, A., Laplana, C., Cuenca-Bescós, G., Parés, J. M. y Huguet, R. (2001): Le gisement pléistocène de la "Sima del Elefante" (Sierra de Atapuerca, Espagne). *L'anthropologie* 105: 301-312.
- Rosas, A., Huguet, R., Pérez-González, A., Carbonell, E., Bermúdez de Castro, J. M., Vallverdú, J., van der Made, J., Allué, E., García, N., Martínez-Pérez, R., Rodríguez, J., Sala, R., Saladie, P., Benito, A., Martínez-Maza, C., Bastir, M., Sánchez, A. y Parés, J. M. (2006). The "Sima del Elefante" cave site at Atapuerca (Spain). *Estudios Geológicos* 62: 327-348.